



Novedades Colombianas

ISSN: 0121-3520

ISSN: 2145-5236

novedadesmuseo@unicauca.edu.co

Universidad del Cauca

Colombia

Fernández Vargas, Karol Daniela; Sierra-Gaviria,
Edwin; Arias Hoyos, Arnol; Fernández Morantes, César
Agroquímicos y foto-fenton: Una revisión sistemática de los impactos
socioambientales y parámetros óptimos de remoción de contaminantes
Novedades Colombianas, vol. 19, núm. 2, 2024, enero
Universidad del Cauca
Colombia

DOI: <https://doi.org/10.47374/novcol.2024.v19.2422>

- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en portal.amelica.org



Agroquímicos y foto-fenton: Una revisión sistemática de los impactos socioambientales y parámetros óptimos de remoción de contaminantes

Agrochemicals and photo-fenton: A systematic review of socio-environmental impacts and optimal contaminant removal parameters

Karol Daniela Fernández Vargas ¹⁻²
Edwin Sierra-Gaviria ¹⁻³
Arnol Arias Hoyos ¹⁻⁴
César Fernández Morantes ¹⁻⁵

1. Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Colombia.
Facultad de Ingeniería
Grupo de Investigación en Tecnología y Ambiente -GITA
Semillero Manejo Integral de Recurso Hídrico.

2. Email: karol.fernandez.v@uniautonoma.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0028-4701>

3. Email: edwin.sierra.g@uniautonoma.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7788-0761>

4. Email: arnol.arias.h@uniautonoma.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9863-1737>

5. Email: cesar.fernandez.m@uniautonoma.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3108-2729>

Resumen

Colombia se distingue por su diversidad y alta producción agrícola; sin embargo, esta productividad implica un amplio uso de agroquímicos. Para el manejo de plagas, enfermedades y/o malezas, los agricultores emplean diferentes plaguicidas, los cuales afectan la calidad del agua y la biota presente a causa de procesos de movilidad a través de escorrentía, filtración o lixiviación. En este contexto, es crucial profundizar en torno a las investigaciones realizadas en Colombia sobre contaminantes emergentes, especialmente a los que se generan por el uso de agroquímicos, y evaluar el tratamiento o efectividad del Foto-Fenton para su eliminación. Se seleccionaron 25 artículos que cumplían con estos criterios para su inclusión. A partir del análisis

Historia del artículo

Fecha de recepción: 23-07-2024

Fecha de aceptación: 11-10-2024

DOI: 10.47374/novcol.2024.v19.2422

de la bibliografía, se identificaron varios contaminantes en fuentes hídricas, como aldrín, atrazina, clordano, dieldrín, DDT, entre otros. La literatura coincide en que la eficiencia del proceso Foto-Fenton está influenciada por la concentración del agente oxidante y del catalizador, así como por el tiempo de reacción, el pH y la temperatura. Se identificó en las investigaciones que, para el tratamiento Foto-fenton de aguas residuales contaminadas con plaguicidas, se registra una eliminación entre 70% y 100% de los contaminantes en condiciones específicas, como un pH de 3,0 a 3,5, relación de H₂O₂/Fe²⁺ de 21,2, exposición a 15 o 30 minutos con radiación UV o solar. En conclusión, la técnica Foto-Fenton se considera efectiva para la eliminación de agroquímicos, pero aún no se han establecido valores óptimos de funcionamiento, que difieren dependiendo del tipo de contaminante. Es necesario continuar la búsqueda de la optimización de estos métodos de tratamiento para preservar la salud de la población, mitigar los impactos ambientales y del ecosistema.

Palabras claves: Foto-Fenton, agroquímicos, degradación, tratamiento de aguas residuales, plaguicidas, revisión sistemática, Colombia.

Abstract

Colombia is known for its diversity and high agricultural production; however, this productivity implies extensive use of agrochemicals. To manage pests, diseases and/or weeds, farmers use different pesticides, which affect water quality and the biota present due to mobility processes through runoff, filtration or leaching. In this context, it is crucial to go deeper into the research carried out in Colombia on emerging contaminants, especially those generated by the use of agrochemicals, and to evaluate the treatment or effectiveness of Photo-Fenton for their elimination. Twenty-five articles that met these criteria were selected for inclusion. From the analysis of the bibliography, several contaminants were identified in water sources, such as aldrin, atrazine, chlordane, dieldrin, DDT, among others. The literature agrees that the efficiency of the Photo-Fenton process is influenced by the concentration of the oxidizing agent and catalyst, as well as by the reaction time, pH and temperature. It was identified in the research that, for the Photo-Fenton treatment of wastewater contaminated with pesticides, a removal between 70% and 100% of the pollutants is recorded under specific conditions, such as a pH of 3.0 to 3.5, H₂O₂/Fe²⁺ ratio of 21.2, exposure to 15 or 30 minutes with UV or so-

lar radiation. In conclusion, the Photo-Fenton technique is considered effective for the elimination of agrochemicals, but optimal performance values have not yet been established, which differ depending on the type of pollutant. It is necessary to continue the search for the optimization of these treatment methods to preserve the health of the population, mitigate environmental and ecosystem impacts.

Keywords: Photo-Fenton, agrochemicals, degradation, wastewater treatment, pesticides, systematic review, Colombia

Introducción

Los contaminantes emergentes (CE) son compuestos químicos de diversos orígenes y naturalezas, que abarcan diferentes tipos con propiedades físicas y químicas variadas (Gil et al., 2012). Entre ellos se encuentran sustancias orgánicas bioacumulativas, persistentemente tóxicas, así como compuestos más polares como productos farmacéuticos, contaminantes particulados (nanopartículas y microplásticos) y agroquímicos, estos han sido identificados recientemente como riesgosos para la salud y el medio ambiente (Gasco Caverro et al., 2024).

Dentro de estos contaminantes emergentes se incluyen los agroquímicos, que actúan a corto plazo sobre el entorno inmediato del área de aplicación. En Latinoamérica estos compuestos químicos son muy utilizados, ya que es una región exportadora de productos agrícolas, por consiguiente, sus países son los mayores usuarios de plaguicidas a nivel mundial que, aunque se han desarrollado para actuar sobre los procesos fisiológicos de las plantas, son los responsables de provocar efectos negativos en el ambiente, la salud y el ecosistema (Grondona et al., 2023).

En Colombia, los agroquímicos se utilizan ampliamente en la agricultura para el control de plagas, enfermedades y malezas. Sin embargo, su manejo se realiza en gran medida de manera empírica y no completamente tecnificada (Cabrera, 2022). Su uso genera importantes problemas socioambientales debido a su impacto en los ecosistemas acuáticos y las especies que los habitan, lo que repercute negativamente en las comunidades humanas que dependen de estos recursos (Vivas Darío, 2020). La contaminación difusa por agroquímicos puede tener efectos tóxicos sobre la fauna acuática, como malformaciones congénitas en anfibios y peces, alteraciones reproductivas y supresión del sistema

inmunológico; lo anterior disminuye las poblaciones de estas especies y genera un impacto económico y cultural en comunidades que valoran estos recursos por su importancia ecológica y simbólica (Orta Arrascaeta, 2002). Por otro lado, la salud de los agricultores también se ve gravemente afectada por la exposición a agroquímicos, lo que puede generar enfermedades respiratorias, problemas dérmicos y trastornos endocrinos. Esta situación no solo pone en riesgo el bienestar de los trabajadores del campo, sino que también incrementa la carga económica en el sistema de salud, debido a las enfermedades asociadas al uso indebido de estos productos (Vásquez Venegas et al., 2015).

Estas técnicas agrícolas provocan la dispersión de agroquímicos en el entorno, causando diversos procesos de cambio y desplazamiento en el medio ambiente, como la movilidad de estos compuestos hacia la matriz hídrica mediante erosión, escorrentía y/o lixiviación, dichos procesos dependen principalmente de estos factores: las condiciones de la región (tipo de suelo, pH, CO₂, cobertura vegetal, topografía del terreno y clima); las propiedades fisicoquímicas del contaminante, como la solubilidad en agua, tiempo de vida media y presión de vapor; las técnicas utilizadas para el cultivo (Casas et al., 2022).

Actualmente, se emplean diversas técnicas para detectar agroquímicos en el medio ambiente, como la cromatografía de gases (GC), cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), cromatografía de fluidos supercríticos (FSC) y cromatografía en capa fina (TLC), que se utilizan para separar y cuantificar plaguicidas en muestras de agua, sin embargo, estas técnicas son costosas y requieren personal especializado (Hernández y Beltrán, 1995). Por esta razón es fundamental promover investigaciones científicas que permitan identificar los efectos socioambientales de los agroquímicos y desarrollar metodologías eficaces para su detección y remoción. Dado que actualmente estos compuestos no están considerados en las políticas públicas ni en los parámetros establecidos para medir la calidad del agua (Perfetti Juan José et al., 2013).

En cuanto a los tratamientos para la remoción de agroquímicos, existen métodos convencionales como coagulación y floculación, pero su efectividad es baja comparada con tecnologías fisicoquímicas como ultrafiltración, oxidación, adsorción y procesos de oxidación avanzada (POA) (Sarria Villa et al., 2022). Específicamente, el proceso foto-fenton es altamente efectivo para la degradación de contaminantes orgánicos, siendo una de las opciones más prometedoras, pues ofrece

ventajas como un costo más bajo a menor escala, estabilidad química y la capacidad de convertir una variedad de compuestos orgánicos nocivos en productos biodegradables y menos peligrosos (Arbeláez Vázquez y Castillo, 2015). Sin embargo, también plantea desafíos en la generación de subproductos, ya que su implementación a gran escala puede presentar dificultades debido al costo asociado con la radiación artificial, como la utilización de lámparas UV (López Ramírez et al., 2021).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal la revisión sistemática sobre el potencial del proceso foto-fenton como una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con agroquímicos. La revisión también se enfocará en analizar el panorama socioambiental por el uso de agroquímicos, la identificación de los compuestos, los porcentajes de remoción de contaminantes alcanzados, los parámetros óptimos de operación del tratamiento foto-fenton (tiempo de reacción, concentraciones y condiciones de radiación). Los resultados de esta revisión sistemática proporcionarán información valiosa para investigadores, profesionales en el sector del agua y tomadores de decisiones, permitiendo evaluar de forma objetiva el potencial del proceso foto-fenton como una alternativa viable para el tratamiento de aguas contaminadas de Colombia.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el proceso foto-fenton para el tratamiento de agroquímicos en Colombia, abordando el panorama socio ambiental derivado del uso de agroquímicos, la detección de estos compuestos en el agua y los porcentajes de remoción en los tratamientos empleados en el país. Esta búsqueda sistemática de la literatura se llevó a cabo en bases de datos multidisciplinarias ScienceDirect, Dialnet y Scopus, seleccionadas por su reconocimiento académico y amplia cobertura en ciencias ambientales, ingeniería química y estudios multidisciplinarios, con especial enfoque en tecnologías de tratamiento de aguas y literatura regional en español. Se empleó la metodología de Arksey y O'Malley, que articula fases como la pregunta de investigación, identificación de criterios de exclusión e inclusión, búsqueda sistematizada, selección y clasificación de los estudios, recopilación y difusión de los resultados (Fernández-Sánchez et al., 2020). En la (Fig. 1) se presentan las fases de la revisión sistemática, comenzando con la pregunta de investigación: ¿Cómo se ha aplicado y evaluado el proceso foto-fenton en el tratamiento de agroquímicos en Colombia?

Se definieron criterios específicos que incluyeron palabras clave como foto-fenton, agroquímicos, degradación, tratamiento de aguas residuales, plaguicidas, herbicidas en Colombia. El análisis empleó tres ecuaciones booleanas específicas: "Photo-Fenton" AND "Agrochemicals" AND "Colombia" AND "Water treatment", "Photo-Fenton" AND "Agrochemicals" AND "Detection" AND "Colombia", "Agrochemicals" AND "Socio-environmental impact" AND "Water" AND "Colombia", diseñadas para filtrar la literatura y enfocarse en estudios relevantes sobre la interacción entre agroquímicos y el proceso Foto-Fenton, incluyendo aplicaciones específicas en Colombia.

Adicionalmente, los criterios de inclusión consideraron artículos publicados entre 2018 y 2024 en español o inglés, que reportaran un porcentaje de remoción de agroquímicos mayor al 50%, que describieran el método foto-fenton y las técnicas de detección de agroquímicos en el agua, incluyendo investigaciones realizadas en departamentos de Colombia que abordaran los impactos socioambientales del tratamiento. Por otro lado, se excluyeron fuentes no disponibles en formato digital, asegurando un enfoque sistemático y accesible en la recopilación de información.

FASES DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA



Figura 1. Fases de la revisión sistemática de acuerdo con Arksey y O' Malley enfocado al proceso Foto-fenton en agroquímicos en Colombia. Fuente: Fernández-Sánchez et al., 2020.

Durante la revisión bibliográfica realizada, se encontró que la base de datos que proporcionó la mayor cantidad de artículos relevantes fue ScienceDirect. Esta plataforma multidisciplinaria contiene una amplia variedad de publicaciones científicas y técnicas, lo que la convierte en una fuente clave para la investigación. Durante esta revisión, se consideró una amplia variedad de artículos

publicados entre 2018 y 2024, priorizando aquellos redactados en inglés. Se identificaron aproximadamente 185 artículos, a los cuales se les aplicaron criterios adicionales para su selección, considerando si el estudio de caso incluye datos cualitativos, como testimonios, o cuantitativos, como estadísticas y porcentajes, que evidencien los efectos negativos socioambientales asociados al uso de agroquímicos, la detección de estos compuestos en el agua, los porcentajes de remoción, la clasificación de agroquímicos y las metodologías utilizadas para implementar la técnica foto-fenton. Finalmente, se seleccionaron 25 artículos que cumplieran con estos criterios para su inclusión en el análisis.

En este contexto, el análisis integral del comportamiento y las tendencias de los estudios realizados desde 2018 revela una notable disparidad en la cantidad de investigaciones. Durante este período, se identificaron 120 artículos enfocados en plaguicidas, mientras que los dedicados a herbicidas alcanzaron solo 51. Cabe destacar que el año con mayor número de publicaciones hasta la fecha es 2023. Esta diferencia en la cantidad de investigaciones sugiere que los plaguicidas son más ampliamente utilizados y, por ende, generan una mayor preocupación, lo que suscita un interés más pronunciado entre la comunidad científica. Este aumento en la atención puede atribuirse a la percepción de los plaguicidas como una amenaza para la salud humana y el medio ambiente, lo que subraya la necesidad de investigaciones adicionales para comprender mejor sus efectos y mitigar los riesgos asociados.

Resultados y Discusión

El panorama socioambiental por el uso de agroquímicos

El uso de agroquímicos es un tema crucial en el contexto socioambiental actual, generando debates y preocupaciones debido a su impacto significativo en la salud humana y el medio ambiente (Vásquez Venegas et al., 2015). En Colombia, investigaciones han revelado que estos productos químicos han causado muertes y enfermedades graves, especialmente entre los trabajadores que los manejan (Polanco López de Mesa, 2020).

Para ratificar lo anterior, se han realizado estudios sobre los efectos sociales y de salud que enfrentan los agricultores al estar en contacto con los agroquímicos como, por ejemplo, en el departamento de Sucre, Colombia, evaluando los conocimientos, actitudes y prácticas de 200 trabajadores agrícolas respecto al

uso de plaguicidas y sus implicaciones para la salud. Se encontraron numerosos incumplimientos de las regulaciones legales relacionadas con el manejo de plaguicidas. Los resultados indicaron un alto nivel de riesgo asociado con el tiempo de uso de plaguicidas y la falta de elementos de protección personal. Se observaron manifestaciones de intoxicaciones y síntomas de salud adversos entre los trabajadores (Gordon Morante y Marrugo Negrete, 2018).

Investigaciones en San Cristóbal, Medellín, Colombia, exploran cómo los agricultores deciden sobre el uso de plaguicidas, diferenciando entre usuarios y no usuarios. Los agricultores que usan plaguicidas lo hacen influenciados por la expectativa de una buena cosecha, el control de plagas, la costumbre, el limitado conocimiento sobre los productos y la creencia en la mejora de la calidad de los cultivos. El uso de equipo de protección personal se ve afectado por problemas económicos y la percepción de que no es necesario. Por otro lado, los agricultores que no usan plaguicidas están motivados por preocupaciones de salud, el peligro percibido de los plaguicidas y la tradición de trabajar sin ellos. La toma de decisiones sobre su uso es compleja y varía entre los grupos, destacando la necesidad de entender esta complejidad para diseñar intervenciones adecuadas (Polanco López de Mesa, 2020).

El uso de plaguicidas en la agricultura es una preocupación sanitaria debido a su uso indiscriminado y la falta de controles que prevengan enfermedades y accidentes laborales (Gordon Morante y Marrugo Negrete, 2018). Las exposiciones prolongadas a plaguicidas pueden afectar la salud al alterar la función de la enzima colinesterasa, que es responsable de la hidrólisis de la acetilcolina y otros ésteres de colina (Luna Rondón et al., 2019).

En el municipio de Totoró, Cauca, Colombia, se realizó un estudio con 125 trabajadores cultivadores de papa, utilizando encuestas y exámenes de sangre para medir la enzima acetilcolinesterasa y su actividad. Los resultados mostraron que el 74,4% de los trabajadores usaban plaguicidas en su trabajo y el 49,6% también en sus hogares, con los organofosforados siendo los más comúnmente usados. Los individuos presentaron el 80% de inhibición de la enzima. Se concluyó que la mayoría de los agroquímicos utilizados en los cultivos pertenecían a la categoría toxicológica III (manzate) y en sus hogares a la categoría I (furan). Aunque la inhibición de la acetilcolinesterasa fue mínima, se reportó el uso de carbamatos, ditiocarbamatos y organofosforados, entre otros (Díaz et al., 2017).

Asimismo, en el departamento de Caldas, se realizó un estudio con 1098 agricultores para determinar la relación de los factores ocupacionales y demográficos en los niveles de la enzima colinesterasa. El 90,8% de los encuestados reportaron riesgo de exposición directa agroquímicos, y el 3,8% mostró niveles anormales de colinesterasa. El estudio reveló que el 75,6% de los agricultores preparan mezclas de insecticidas, el 22,2% aplican plaguicidas varias veces por semana y el 37,8% durante la fumigación no usan ropa de protección. Se observó que la inhibición de la colinesterasa aumentaba cuanto menor era el tiempo. Los plaguicidas más comunes fueron los organofosforados (58,6%). La informalidad laboral dificulta el control de la exposición a agroquímicos, destacando la necesidad de fortalecer programas de capacitación, seguridad en el trabajo y medidas de higiene (Toro-Osorio et al., 2017).

En San Cristóbal, municipio de Medellín, Antioquia, se midió este biomarcador en 40 agricultores y se relacionó con datos demográficos, examen clínico y prácticas agrícolas. Los niveles de la enzima colinesterasa eritrocitaria fueron significativamente más altos en aquellos que no usaban plaguicidas organofosforados y carbamatos. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en los niveles de colinesterasa entre los practicantes de agroecología y los usuarios de plaguicidas. Se observó poca supervisión técnica en el uso adecuado de plaguicidas y un uso deficiente de equipo de protección personal. No se encontraron registros de intoxicación por plaguicidas durante la recolección de datos (Polanco López-de-Mesa et al., 2019).

Con lo mencionado anteriormente, es importante destacar que todas estas investigaciones tienen algo en común: los agroquímicos organofosforados. Por ello, también se han realizado estudios sobre intoxicaciones provocadas por la exposición a estos tóxicos, los cuales reducen la actividad de la colinesterasa plasmática y de la eritrocitaria (Fernández A. et al., 2010). Por otra parte, se han investigado otras enfermedades como el hipotiroidismo, en un estudio con 819 participantes en el municipio de Quindío, zona de productores de plátano y café, se encontró una asociación no causal entre los plaguicidas organoclorados, heptacloro, endosulfán I y 4,4'-DDE y el hipotiroidismo subclínico (Londoño et al., 2018). Así mismo, se examinaron los impactos del glifosato en espermatozoides humanos en un entorno de laboratorio, centrándose en las formulaciones Panzery y Roundup. Este estudio evaluó cómo afectaban la movilidad y viabilidad de los espermatozoides, llegando a la conclusión de que el glifosato podría tener efectos citotóxicos en individuos expuestos, afectando

potencialmente su capacidad reproductiva (Morales Velásquez et al., 2021).

En cuanto a los efectos ambientales del uso de agroquímicos, encontramos un estudio de caso en el suroeste antioqueño, cuyo objetivo fue evaluar los efectos ambientales en agroecosistemas de plátano vinculados con café mediante un enfoque de análisis de ciclo de vida. En esta investigación se evaluaron cinco impactos ambientales, acidificación terrestre, eutrofización acuática, calentamiento global, ecotoxicidad acuática y uso del suelo en el consumo de recursos, emisiones y agroecosistemas plataneros asociados con café. La producción de café tuvo un impacto ambiental mayor en comparación con la producción de plátano. Las etapas que más contribuyeron a la carga ambiental en ambos cultivos fueron el establecimiento, propagación y la producción, principalmente debido al uso y fabricación de fertilizantes (Valenzuela-Vergara et al., 2019).

En Colombia, el glifosato, particularmente en su formulación Roundup Activo®, se emplea para el control de malezas, afectando los ecosistemas acuáticos y provocando malformaciones en anfibios. Un estudio investigó los efectos de concentraciones subletales de glifosato en la piel de la rana tropical *D. molitor*. Fueron expuestos 24 renacuajos a varias concentraciones de glifosato durante 31 días. El análisis morfométrico reveló cambios en el grosor de la dermis, con un aumento en la región dorsal craneal y variaciones en la región ventral caudal. Estas alteraciones podrían poner en riesgo la supervivencia de la especie en su entorno natural (López-Flórez et al., 2023).

En relación con este tema existe una cantidad mínima de investigaciones sobre los efectos de los agroquímicos en el medio ambiente, en comparación con los estudios que abordan sus impactos en la salud humana. Esta disparidad revela una brecha crítica en nuestra comprensión de cómo estos productos químicos afectan los ecosistemas, la biodiversidad y la calidad del suelo y el agua. Continuar con este tipo de investigaciones es fundamental, ya que un enfoque integral que incluya tanto los efectos ambientales como los sanitarios permitirá desarrollar estrategias más efectivas y sostenibles para el manejo de agroquímicos.

Identificación de agroquímicos en el agua

Es un tema de gran importancia y relevancia ambiental debido a los posibles efectos adversos que estos compuestos pueden tener en los ecosistemas acuáticos. En

la agricultura, los agroquímicos, utilizados ampliamente para controlar plagas, pueden ingresar al agua a través de diversas vías, incluyendo escorrentía superficial, lixiviación desde suelos tratados y aplicación directa en cuerpos de agua, además, es esencial evaluar el nivel de contaminación y tomar medidas adecuadas de gestión y control (Grondona et al., 2023).

El uso de agroquímicos en la agricultura y la acumulación de oligoelementos ejercen una influencia perdurable en la calidad del suelo, los sedimentos y el agua. Este efecto puede analizarse en profundidad a partir de un estudio que indica la presencia de plaguicidas y metales traza en suelos agrícolas y sedimentos en la cuenca del río Sogamoso, Colombia. Se encontraron distintos tipos de plaguicidas en las muestras de agua, incluyendo organofosforados (70%), organoclorados (80%) y fungicidas (10%), con concentraciones que variaron entre 0,2-4,1 µg/kg en aguas. Además, se identificaron metales traza cuyas concentraciones superaron los estándares internacionales de calidad en ciertos casos. En particular, las concentraciones de cobre (Cu) y zinc (Zn) sobrepasaron los límites establecidos. Los resultados revelan una amplia presencia de diversas combinaciones de metales traza, compuestos organoclorados históricos y pesticidas modernos en toda la cuenca, lo que indica que la agricultura convencional es una de las principales fuentes de contaminación del suelo en la región (Gallego et al., 2024). Por lo tanto, se requiere una mayor investigación en el país para identificar y controlar la presencia de estos químicos en el agua. Además, resulta crucial promover la adopción de prácticas agrícolas sostenibles como medida para mitigar los efectos adversos sobre los ecosistemas y la salud humana.

Entre los estudios revisados se detectaron investigaciones sobre plaguicidas organofosforados y organoclorados en ríos (Sarria Villa et al., 2022), en muestras biológicas humanas (Badii y Varela, 2018) y en los tejidos de peces (López-Flórez et al., 2023), lo que destacan un impacto significativo del uso de agroquímicos en el entorno ambiental y de salud en Colombia. En la investigación realizada por Salcedo Monsalve et al. (2012) se identificaron biomarcadores de exposición y efectos de los niveles de plaguicidas en el pez capitán de la sabana (*Eremophylus mutisii*), especie que habita en Suesca, a orillas del río Bogotá. Los estudios consideraron la exposición ocupacional a plaguicidas y el grado de conocimiento y aplicación de medidas de protección personal durante las actividades laborales, así como el hábito de pesca y consumo del pez capitán por parte de los habitantes de esta zona ribereña.

La presencia de plaguicidas en el agua tiene consecuencias negativas, como la toxicidad aguda y crónica para organismos acuáticos, el deterioro de la calidad del agua y la bioacumulación en la cadena alimentaria, lo que potencialmente afecta a la vida silvestre y a los seres humanos que dependen del agua para consumo y recreación. Esta situación se identificó en la amazonia ecuatoriana, donde la pesca ilegal con agroquímicos y explosivos es un problema descontrolado que está provocando daños duraderos e irreversibles a los ecosistemas acuáticos. Los agroquímicos identificados, clasificados por frecuencia de uso, fueron Rotenona, Palmarol, Nuvan, Metavin (Romero-Estévez et al., 2023).

La investigación realizada por Sarria Villa et al. (2022), buscó definir las condiciones óptimas para la extracción y detección de plaguicidas como propanil, carbaril, diurón, metomil, atrazina, simazina en sedimentos y agua del río Cauca, Colombia. Se utilizaron técnicas de extracción sólida (SPE) y ultrasonido, seguidas de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-UV) para el análisis. Los resultados revelaron una alta eficacia de recuperación, especialmente para simazina, atrazina y diurón, los plaguicidas más prevalentes en las muestras obtenidas del río Cauca.

Los agroquímicos se clasifican por sus compuestos químicos, entre ellos están los organoclorados, que son productos derivados de hidrocarburos que contienen cloro que se distinguen por su capacidad de disolverse fácilmente en solventes orgánicos. Estos compuestos se clasifican como Compuestos Orgánicos Persistentes (COP) debido a su resistencia a la degradación ambiental. Algunos ejemplos incluyen endrín, dieldrín, aldrín,

DDT (dicloro difenil tricloroetano), endosulfán, clordano y 2,4-D, HCH (lindano), heptacloro, toxafeno, entre otros (Ministerio de Salud y Protección Social e Instituto Nacional de salud, 2015). También, existen los organofosforados, que son compuestos químicos derivados del ácido fosfórico, esta categoría incluye compuestos como el paratión, clorpirifos, diazinón, diclorvos, malatión y dimetoato (Fernández A. et al., 2010). Otro grupo son los carbamatos, que por lo general no se acumulan en los organismos y se descomponen rápidamente mediante hidrólisis y foto degradación (Instituto Nacional de salud, 2010).

La documentación sobre la presencia de agroquímicos en fuentes de agua superficial y suelos en Colombia ha sido limitada hasta la fecha. No obstante, se han identificado diversos compuestos químicos en estos estudios mediante tecnologías analíticas, como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y la cromatografía de gases (GC), las cuales se destacan por su alta sensibilidad y precisión, permitiendo la detección de agroquímicos, incluso en concentraciones extremadamente bajas (Fig. 2) (Torres Gutierrez et al., 2021). Los hallazgos se pueden clasificar así: organoclorados: (β -BHC) Metolachlor, endosulfán, atrazina, bromacil, DDE, difenoconazole, diurón, terbuthylazine, clorotalonil, tebuconazol, clorotalonilo; organofosforados: clorpirifos, coumaphos, diclorvos, diazinón, etoprofos, fenamifos, malatión; carbonatos: carbaril, carbofurano, carbendazim; y otros como: piretrinas, piretroides y funguicidas, presentes en diferentes cultivos como flores, cebolla, café, entre otras (Aguilar Mora et al., 2014; Gallego et al., 2024; Hernández et al., 2024; Salcedo Monsalve et al., 2012; Tejeda-Benítez et al., 2023).

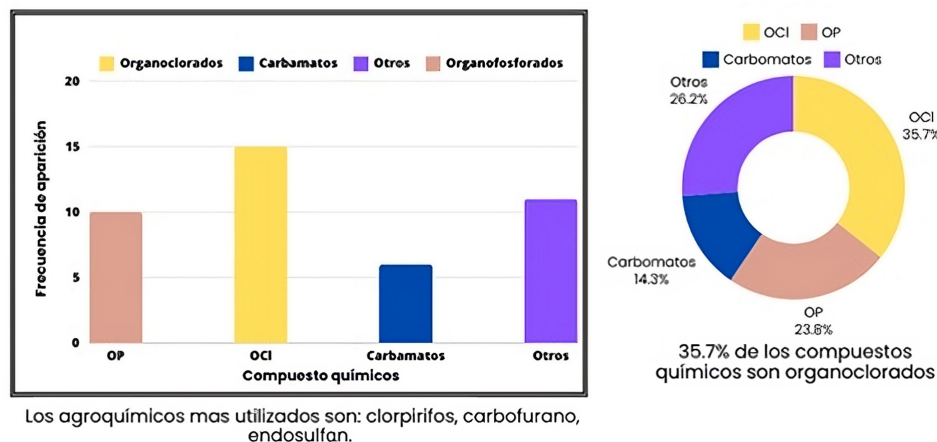


Figura 2. Agroquímicos detectados en recursos hídricos en Colombia.

Después de la revisión y el análisis de los estudios, podemos determinar que los agroquímicos más comúnmente detectados en fuentes hídricas incluyen el clorpirifos (Tobón-Marulanda et al., 2010), el endosulfán (Betancur J. et al. 2015) y el carbofurano (Torres Gutierrez et al., 2021). El clorpirifós, ampliamente utilizado a nivel mundial, se asocia con la contaminación de varios entornos como suelos, aire y organismos no objetivo. Además de ser potencialmente tóxico para humanos y otros seres vivos, el clorpirifós puede provocar trastornos neuronales y endocrinos debido a su persistencia en el ambiente, con una vida media que varía de 60 a 120 días (Torres Gutierrez et al., 2021). El endosulfán, otro hidrocarburo clorado utilizado globalmente, se caracteriza por su toxicidad, capacidad de bioacumulación y persistencia, lo que ha resultado en su prohibición en numerosos países, aunque su uso persiste en algunas regiones (Betancur J. et al. 2015). Por último, el carbofurano, insecticida utilizado en cultivos como la papa, aunque menos persistente que otros pesticidas, ha demostrado efectos adversos en insectos beneficiosos, aves y peces. Aunque su impacto en la salud humana es menor en comparación con otros plaguicidas, puede causar problemas si se ingiere, inhala o se tiene contacto con la piel (Moreno Silva y Ruiz Valencia, 2009).

El 35,7 % de los agroquímicos encontrados son compuestos organoclorados, a pesar de que el Ministerio de Salud colombiano prohibió su uso en 1993 mediante la Resolución 10255 de ese año. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) es responsable de mantener actualizada la lista de productos prohibidos o restringidos, y hasta la fecha, la única excepción es el 2,4-D (Ministerio de Salud y protección social, 2015). Estos compuestos tienen baja solubilidad en el agua y alta solubilidad en disolventes orgánicos, lo que los hace propensos a acumularse en el tejido graso de los organismos vivos. Esto se debe a su estabilidad química y resistencia a los microorganismos, lo cual los hace especialmente persistentes en el medio ambiente, contribuyendo a la contaminación del suelo, agua, alimentos y aire (Arias Verdes et al., 1990).

Eficiencia de remoción y parámetros óptimos del proceso foto-fenton

En Colombia, existe una notable carencia de investigaciones centradas en la aplicación del proceso foto-fenton para el tratamiento de contaminantes, especialmente en el ámbito de los plaguicidas. Esta deficiencia se evidencia por la escasez de estudios y publicaciones

que aborden específicamente las aplicaciones y la eficacia del foto-fenton en la remoción de contaminantes químicos.

El proceso foto-fenton consiste en la combinación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con iones de hierro (Fe^{2+}), catalizados por la radiación ultravioleta (UV) o la luz solar, para generar radicales libres altamente oxidantes, como el radical hidroxilo ($\bullet OH$). Estos radicales tienen la capacidad de descomponer una amplia variedad de contaminantes orgánicos persistentes presentes en el agua, incluyendo compuestos como plaguicidas, colorantes y contaminantes emergentes (Wang et al., 2023). De los estudios encontrados sobre la descontaminación del agua, está el realizado por Mendoza-Marín et al. (2010), el cual se llevó a cabo en el Valle del Cauca, una región destacada por su alta producción de caña de azúcar en Colombia y por la presencia significativa de herbicidas, especialmente ácido 2,4-diclorofenoxiacético y Diurón. En esta investigación, se empleó una combinación de técnicas de foto-fenton solar y tratamientos biológicos para lograr la mineralización y degradación de los pesticidas. Los resultados mostraron una mineralización del 79,8% en aguas residuales preparadas y del 82,5% en aguas residuales industriales reales, utilizando bajas concentraciones de Fe^{2+} y H_2O_2 . Este enfoque demostró ser efectivo para la eliminación de contaminantes en un entorno caracterizado por altas concentraciones de herbicidas agrícolas (Mendoza-Marín et al., 2010).

Se llevó a cabo otro proyecto en zonas del Valle del Cauca, con el objetivo de mejorar la salud de la población y sostenibilidad ambiental expuesta a plaguicidas como el 2,4 D, la ametrina y diurón. Para lograrlo, se empleó una combinación de PAO con energía solar y tecnologías de tratamiento biológico. Los tratamientos más efectivos, identificados previamente en laboratorio, se aplicaron en una planta piloto de detoxificación solar, utilizando condiciones y plaguicidas reales. La degradación se determinó mediante diversas técnicas analíticas, como pH, GC-MS, DQO, COT y HPLC. En el proceso foto-fenton, se vertieron 250 mL de agua a tratar en un vaso de precipitados, para ajustar el pH a 2,8, se agregó HCl 0,1M, seguido de 6,25 mg de sulfato de hierro ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) para obtener 5 ppm de hierro. Posteriormente, el recipiente se colocó bajo el simulador solar y se agregó la mitad de la cantidad estequiométrica necesaria de H_2O_2 para oxidar los contaminantes presentes en el agua residual (Ortiz, 2013).

En otro estudio, se evaluó la efectividad de los POA foto-fenton, fenton y UV/H₂O₂ para disminuir la presencia de clorpirifós en los vertidos de los laboratorios de agroquímica de la Universidad de Cartagena. Los requisitos técnicos para implementar una planta piloto incluyen una concentración óptima de 540 ppm de H₂O₂ y 2,5 ppm de Fe²⁺, con un tiempo de operación de 5 a 8 horas en un reactor de 12,5 L, a una temperatura de 27°C y un pH de 3. Además, se requiere un mecanismo de agitación dentro del reactor. Se logró una eficiencia del 96,53% para el tratamiento foto-fenton, 45,40% para fenton y 30% para UV-H₂O₂ en la reducción del clorpirifós. Estos resultados coinciden con investigaciones anteriores, atribuyendo el éxito al efecto combinado la fotólisis de la luz ultravioleta y la catálisis del hierro (Barliza Colorado y Torres Chisino, 2018).

En un estudio llevado a cabo en Medellín por parte de Vásquez et al. (2013), se examinó la degradación foto catalítica del plaguicida clorotalonilo mediante el uso de dióxido de titanio y el proceso de Fenton con un colector solar. Se logró una eliminación en del 95% del clorotalonilo en un lapso de 4 horas de exposición solar con 500 mg/l de TiO₂ y 1,0 mg/l de persulfato de sodio.

Se observó que el dióxido de titanio presentaba una tasa de degradación más alta y una mineralización del 80%, en comparación con el 72% obtenido mediante el foto-fenton. La mineralización se evidenció por la reducción del carbono orgánico total y la formación de cloruros y nitratos. A pesar de la detección de 6 sub-productos, su baja concentración podría asociarse con la elevada toxicidad del efluente final.

En términos generales, las investigaciones encontradas para esta revisión muestran que los porcentajes de remoción de los tratamientos varían entre el 70% y el 100%. Esta variabilidad depende de factores como la temperatura, el tiempo de reacción, el pH y la concentración del agente oxidante y catalítico. Además, la eficacia de este proceso se ve influenciada por la naturaleza del contaminante y la presencia de otros compuestos en el agua residual, lo que subraya la importancia de caracterizar cada tipo de agua residual antes de su tratamiento (Rubio-Clemente et al., 2014).

La cantidad de H₂O₂ y sales de hierro empleadas varía según el contaminante a eliminar, y aunque un aumento en estas concentraciones puede acelerar la degradación, un exceso puede limitarla debido a reacciones secundarias. Mientras que la temperatura favorece la

cinética de oxidación, temperaturas elevadas pueden afectar la estabilidad del H₂O₂. El pH óptimo para el proceso Fenton se sitúa alrededor de 2,8, ya que valores muy ácidos o alcalinos pueden reducir su eficacia. Además, periodos cortos de reacción han demostrado ser económicamente viables para lograr niveles adecuados de degradación. La eficiencia del proceso Fenton varía según el tipo y nivel de contaminante, ya que altas concentraciones pueden acelerar la degradación, pero también pueden reducir la eficacia debido a una menor interacción entre los contaminantes y los radicales °OH (Garzón-Cucaita y Carriazo, 2022; Rubio-Clemente et al., 2014).

Se identificó una diversidad de enfoques metodológicos para la implementación del proceso foto-fenton en el tratamiento de aguas contaminadas con agroquímicos. Entre las variables clave se encuentra el tiempo de reacción, que varía entre 15 y 30 minutos. En cuanto a la dosificación de peróxido de hidrógeno, aún no se ha establecido un rango específico, con valores que oscilan entre 72 mg/l y 121,6 mg/l. La concentración de hierro utilizada se encuentra en el rango de 9 mg/l a 20 mg/l. Además, se considera la intensidad de la luz UV y otras condiciones de reacción como aspectos importantes en la aplicación efectiva del proceso foto-fenton.

En la Tabla 1 se presenta de manera concisa un resumen de las condiciones de reacción y los porcentajes de degradación obtenidos en varios estudios que investigaron la aplicación del proceso foto-fenton para tratar los principales agroquímicos.

El proceso foto-fenton ha comenzado a ser optimizado, ya que, actualmente, no existen rangos de condiciones óptimas definitivos, dado que su efectividad varía considerablemente dependiendo del tipo de contaminante a tratar (Garzón-Cucaita y Carriazo, 2022; Rubio-Clemente et al., 2014). En este sentido, la optimización se centra en la incorporación de nuevos materiales, como la magnetita, que mejoran la eficiencia global del proceso (Fernández-Sánchez et al., 2020). Esto permite superar algunas limitaciones del método tradicional, como la necesidad de controlar estrictamente el pH o el tiempo de reacción, y facilita la adaptación del tratamiento para abordar una mayor variedad de contaminantes, incluidos los agroquímicos (Rubio-Clemente et al., 2014).

En Colombia, la Universidad del Valle ha evaluado el proceso foto-fenton con magnetita como catalizador para la degradación de cafeína a escala piloto. Se deter-

minó la concentración de magnetita y la relación molar H₂O₂/Fe²⁺ para las pruebas finales, estableciéndose en 160 ppm y 4:1, respectivamente. Los resultados mostraron que el porcentaje máximo de degradación de cafeína alcanzado fue del 97,69%, bajo condiciones

de 20 ppm de cafeína y pH = 3 (Fernández-Sánchez et al., 2020). Estos estudios abren nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia en la eliminación de contaminantes como los agroquímicos, marcando un avance significativo en la búsqueda de soluciones más sostenibles y efectivas en el tratamiento de aguas.

Tabla 1 Aplicación de Foto-Fenton para el tratamiento de agroquímicos

Condiciones de reacción	Remoción (%)	Contaminante	Referencia
Se homogeniza el AR y contaminantes estudiados T:30min H ₂ SO ₄ : 2,8-3,0 Fe ²⁺ de 9,4 mg/L H ₂ O ₂ : 72 mg/L T: 15 min NaOH	ARP: 79,8% ARI: 82,5%	Diurón y ácido 2,4-diclorofenoxiacético	(Mendoza-Marín et al., 2010)
pH a 2,8 - HCl 0.1M. 6.25 mg de sulfato de hierro (FeSO ₄ ·7H ₂ O) para obtener 5 ppm de hierro. Se expone al simulador solar Se agrega H ₂ O ₂ .	La disolución de 50 mg/L de 2,4-D, 30 mg/L de Diurón y 50 mg/L de Ametrina, es del 100%	Diurón, el 2,4 D y la ametrina	(Ortiz, 2013)
Concentración óptima para un reactor de 12.5 L Fe ²⁺ : 2,5 ppm H ₂ O ₂ : 540 ppm Tiempo de operación: 5.8 h T: de 27°C pH de 3. mecanismo de agitación.	foto-fenton: 96,53% Fenton: 45.40% UV-H ₂ O ₂ : 30%	clorpirifós	(Barliza Colorado et al., 2018)
Fe ²⁺ /H ₂ O ₂ Fe ³⁺ /H ₂ O ₂ TiO ₂ y TiO ₂ /N / A ₂ S ₂ O ₈ TiO ₂ : 200 mg/l Fe ²⁺ , Fe ³⁺ :10 mg/L H ₂ SO ₄ : 2,5 a 2,8 T:30min	Alaclor y diurón: t _{30 W} para 10 mg/L de Fe ²⁺ y Fe ³⁺ : 100%, para la atrazina representa el anillo de triazina no degradable.	Alaclor: 50 mg/L Atrazina: 25 mg/L Diurón: 30 mg/L	(Pérez et al., 2006)
Modelo Box-Benkhen variables: T 30W = 15 min con 17,1 mg l-1 de Fe ²⁺ y 121,6 mg l-1 de H ₂ O ₂ .	Fenton: 76,7% La eliminación fue determinada por la relación DBO ₅ /DQO	carbofurano (C ₁₂ H ₁₅ NO ₃) 93,2 mg l-1	(Hernández-Shek et al., 2012)

Conclusiones

La problemática del uso de agroquímicos es un tema de gran relevancia en el contexto socioambiental actual, generando debates y preocupaciones debido a su impacto significativo en el medio ambiente y la salud humana. En Colombia, diversas investigaciones han demostrado que los agricultores que manipulan agroquímicos están expuestos a un alto riesgo para su salud, también se han identificado incumplimientos de las regulaciones relacionadas con el manejo de pla-

guicidas, así como manifestaciones de intoxicaciones y síntomas adversos de salud entre los trabajadores agrícolas. La falta de uso de equipo de protección personal y la escasa supervisión técnica durante la aplicación de plaguicidas agravan esta situación. Además, estudios han revelado asociaciones entre la exposición a plaguicidas y diversas enfermedades, como la inhibición de la colinesterasa y el hipotiroidismo. Incluso se han encontrado efectos adversos sobre la fertilidad masculina debido a la exposición al glifosato, uno de los herbicidas más utilizados en el mundo.

Los agroquímicos han dejado una marca profunda en los agroecosistemas y la biodiversidad acuática. El glifosato, en particular, ha demostrado tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos, con estudios que muestran malformaciones en anfibios expuestos a concentraciones subletales durante períodos prolongados. Sin embargo, es crucial señalar la notable disparidad en la investigación sobre los efectos ambientales de los agroquímicos en comparación con los estudios centrados en la salud humana. Esta brecha resalta la importancia de comprender más profundamente cómo estos productos químicos afectan los ecosistemas, la biodiversidad y la calidad del suelo y el agua.

Por otro lado, se concluye que existen múltiples informes sobre la detección de pesticidas en el agua, animales y seres humanos. Estos reportes evidencian la presencia generalizada de pesticidas en diferentes matrices ambientales y biológicas, lo que plantea preocupaciones significativas para la salud pública y la conservación del medio ambiente. Se identificaron múltiples compuestos químicos en dichos estudios como organoclorados, organofosforados, carbonatos y otros compuestos, en diferentes cultivos como: flores, cebolla, café, entre otras. Estos se han hallado utilizando tecnologías analíticas para detectar agroquímicos, como el HPLC y el GC, que destacan por su alta sensibilidad y capacidad para detectar en niveles bajos. Los agroquímicos más comúnmente detectados en fuentes hídricas incluyen el clorpirifos, el endosulfán y el carbofurano.

Se identificó la relevancia de conocer e implementar nuevas tecnologías efectivas para el tratamiento de aguas contaminadas con agroquímicos y otros compuestos químicos. A través de diversos estudios encontrados, se evidenció que la técnica de oxidación avanzada foto-fenton puede lograr una alta eficiencia de remoción que oscila entre el 70% y 100% dependiendo de la metodología utilizada y la complejidad del contaminante, en este caso, específicamente de alaclor, atrazina, diurón, entre otros.

Los parámetros clave para lograr un alto porcentaje de remoción en el proceso foto-fenton incluyen varios factores críticos. En primer lugar, el tiempo de reacción, que generalmente oscila entre 15 y 30 minutos, es fundamental para optimizar la degradación de los contaminantes. Asimismo, la dosificación de H_2O_2 , aunque no cuenta con un rango específico claramente establecido, suele variar entre 72 mg/L y 121,6 mg/L. Otro aspecto relevante es la concentración de hierro, que típicamen-

te se sitúa entre 9 mg/L y 20 mg/L, especialmente en condiciones de pH ácido, lo que favorece la formación de radicales hidroxilos. Finalmente, la intensidad de la luz UV o solar, junto con otras condiciones de reacción, desempeña un papel crucial en la efectividad global del proceso Foto-Fenton, maximizando su eficiencia en la remoción de contaminantes.

Referencias

Aguilar Mora, P., Chin Pampillo, J. y Ruíz Hidalgo, K. 2014. Uso del “Pesticide Impact Rating Index” (PIRI) para estimar la peligrosidad del uso de plaguicidas en el cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.). *O Mundo Da Saúde*, 42, 24–30. <https://doi.org/10.15343/0104-7809.20143801024030>

Arbeláez Vázquez, N. y Castillo, J. E. (2015). Evaluación del proceso foto-fenton con magnetita como catalizador en la degradación de cafeína en un reactor solar CPC a escala piloto. Universidad del Valle.

Arias Verdes, J. A., Companioni R., D., Rivera Betancourt C. y Cabrera Cruz, N. 1990. Plaguicidas Organoclorados. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Metepec, México.

Badii, M. H. y Varela, S. 2015. Insecticidas Organofosforados: Efectos sobre la Salud y el Ambiente. *Cult. Científ. y Tecnol.*, 5 (28).

Barliza Colorado, V. D. y Torres Chisino, D. L. 2018. Evaluación de los procesos de oxidación avanzada: fenton, Uv/H₂O₂ y foto-fenton para la degradación de clorpirifós en aguas residuales a nivel laboratorio en la universidad de Cartagena. Trabajo de grado en Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías, programa de Ingeniería Química. Fundación Universidad de América. Bogotá. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7202>

Betancur J., L. A., Ocampo C., R. y Ríos V., L. A. 2015. La problemática del endosulfán: aspectos químicos, analíticos y ambientales. *Luna Azul*, 40, 293–313. <https://doi.org/10.17151/10.17151/luaz.2015.40.19>

Cabrera, L. M. M. 2022. Consumo e impactos de los agrotóxicos en Colombia: comunidades envenenadas. *Saúde Em Debate*, 46(spe2), 75–88. <https://doi.org/10.1590/0103-11042022e205>

Casas, J. C., Pérez, E. H., Hurtado, J. D., Quiroz, C. L., Correa, M. y Cabrera, E. 2022. Mobility assessment of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in andic soils of the department of Cauca, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgación Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1772>

Díaz, S. M., Sánchez, F., Varona, M., Eljach, V. y Muñoz G, Ma. N. 2017. Cholinesterase levels in potato growers occupationally exposed to pesticides, Totoro, Cauca. *Revista de La Universidad Industrial de Santander Salud*, 49(1), 85–92. <https://doi.org/10.18273/revsal.v49n1-2017008>

Fernández A., D. G., Mancipe G., L. C. y Fernández A., D. C. 2010. Intoxicación por organofosforados. *Revista Med*, 18(1), 84-92. <https://doi.org/10.18359/rmed.1295>

Fernández-Sánchez, H., King, K. y Enríquez-Hernández, C. B. 2020. Revisiones Sistemáticas Exploratorias como metodología para la síntesis del conocimiento científico. *Enfermería Universitaria*, 17(1). <https://doi.org/10.22201/eneo.23958421e.2020.1.697>

Gallego, J. L., Shipley, E. R., Vlahos, P. y Olivero-Verbel, J. 2024. Occurrence and toxicological relevance of pesticides and trace metals in agricultural soils, sediments, and water of the Sogamoso River basin, Colombia. *Chemosphere*, 354, 141713. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141713>

Garzón-Cucaita, V. y Carriazo, J. G. 2022. Óxidos de hierro como catalizadores de procesos tipo Fenton con potencial aplicación en tecnologías de remoción de contaminantes. *Tecnológicas*, 25(55), e2393. <https://doi.org/10.22430/22565337.2393>

Gasco Cavero, S., Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Laspidou, C., Díaz-Cruz, S., Contreras-Llin, A., Quintana, G. y García-Gil, A. 2024. Comparative study of emerging pollutants of interest in the groundwater of the volcanic islands of La Palma and El Hierro (Canary Islands). *Science of the Total Environment*, 927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172026>

Gordon Morante, C. y Marrugo Negrete, J. L. 2018. Prácticas Agrícolas Y Riesgos A La Salud Por El Uso De Plaguicidas En Agricultores Subregión Mojana – Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9 (1), 29-40. <https://doi.org/10.22490/21456453.2098>

Grondona, S. I., Lima, M. L., Massone, H. E. y Miglioranza, K. S. B. 2023. Pesticides in aquifers from Latin America and the Caribbean. *Science of the Total Environment*, 901, 165992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165992>

Instituto Nacional de salud. 2010. Protocolo de vigilancia y control de intoxicaciones por plaguicidas.

Hernández, F. y Beltrán, J. 1995. Análisis de residuos de plaguicidas en aguas. *Avances en la investigación en ZNS*, 2. Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo.

Hernández, F., Ibáñez, M., Portoles, T., Hidalgo-Troya, A., Ramírez, J. D., Paredes, M. A., Hidalgo, A. F., García, A. M. y Galeano, L. A. 2024. High resolution mass spectrometry-based screening for the comprehensive investigation of organic micropollutants in surface water and wastewater from Pasto city, Colombian Andean highlands. *Science of the Total Environment*, 922, 171293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171293>

Hernández-Shek, M. A., Agudelo Henao, A. C., Mendoza Marín, C. y Torres Castañeda, H. 2012. Solar Photo-Fenton optimisation in treating carbofuran-contaminated water. *Ingeniería e Investigación*, 32(1), 71-76. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v32n1.28528>

Gil, M. J., Soto, M. A., Usma, I. J. y Gutiérrez, D. O. 2012. Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments. *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73

Londoño, Á. L., Restrepo, B., Sánchez, J. F., García-Ríos, A., Bayona, A. y Landázuri, P. 2018. Pesticides and hypothyroidism in farmers of plantain and coffee growing areas in Quindío, Colombia. *Revista de Salud Publica*, 20(2), 215-220. <https://doi.org/10.15446/rsap.v20n2.57694>

López Ramírez, M. A., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. del R., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A. y Ortiz Muñiz, B. 2021. Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76–87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>

López-Flórez, C., Ruíz, M. A. O., & Gómez-Ramírez, E. (2023b). Effect of sublethal concentrations of glyphosate-based herbicides (Roundup Active®) on skin of the tropical frog (*Dendropsophus molitor*). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(50), 109618–109626. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29816-8>

Luna Rondón, J. M., Hanna Lavalle, M. I. y Amador, C. E. 2019. Condición clínica y niveles de colinesterasa de trabajadores informales dedicados a la fumigación con plaguicidas. *In Nova* 17(31),67–77. <https://doi.org/10.22490/24629448.3623>

Mendoza-Marín, C., Osorio, P. y Benítez, N. 2010. Decontamination of industrial wastewater from sugarcane crops by combining solar photo-Fenton and biological treatments. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 851–855. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.111>

Ministerio de Salud y protección social. 2015. Residuos de plaguicidas organoclorados en matrices de carne y leche de origen bovino. Instituto Nacional de Salud.

Ministerio de Salud y Protección Social e Instituto Nacional de salud. 2015. Evaluación de riesgos en inocuidad de alimentos.

Morales Velásquez, M., Velásquez Rivera, V. y Cardona Maya, W. D. 2021. The Effect of Glyphosate on Human Sperm: In Vitro Approximation. *Urologia Colombiana*, 30(3), E194–E198. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1731413>

Moreno Silva, C. P. y Ruiz Valencia, L. P. 2008. Degradación de carbofurán presente en el suelo como consecuencia del cultivo de papa por medio de oxidación avanzada y tratamiento biológico acoplados. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Uniandes, Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Química. <http://hdl.handle.net/1992/24311>

Orta Arrazcaeta, L. 2002. Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos. 6(3), 2–9.

Ortiz, G. 2013. Depuración de aguas contaminadas con plaguicidas empleados en cultivos de caña de azúcar en Colombia. Universidad Politécnica de Valencia.

Pérez, M. H., Peñuela, G., Maldonado, M. I., Malato, O., Fernández-Ibáñez, P., Oller, I., Gernjak, W., y Malato, S. 2006. Degradation of pesticides in water using solar advanced oxidation processes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 64(3–4), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.11.013>

Polanco López-de-Mesa, Y. 2020. The decision-making process of synthetic pesticide use in agricultural communities in Colombia: A grounded theory approach. *Revista Facultad Nacional de Salud Publica*, 38(2). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e331277>

Polanco López-de-Mesa, Y., Hernández-Carmona, D., Escobar-Pérez, M. L., Aguirre-Acevedo, D. C., & Parra-Hernández, Á. 2019. Measurement of erythrocyte cholinesterase levels in farmers who use pesticides and agroecology practitioners from San Cristóbal, Medellín, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 37(3), 25–33. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v37n3a04>

Romero-Estévez, D., Yáñez-Jácome, G. S. y Navarrete, H. 2023. Non-essential metal contamination in Ecuadorian agricultural production: A critical review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104932>

Rubio-Clemente, A., Chica, E. L. y Peñuela, G. A. 2014. Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater (Vol. 16, Issue 2).

Rubio-Clemente, A., Chica, E. L. y Peñuela, G. A. 2014. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería Y Competitividad*, 16(2), 211–223. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3696>

Salcedo Monsalve, A., Díaz Criollo, S. M., Varona Uribe, M. E., González Mantilla, J. F. y Rodríguez Forero, A. 2012. Exposure to Pesticides in Residents or the Banks of the Río Bogotá (Suesca) and the Capitan Fish. *Revista Ciencias De La Salud*, 10, 29–41.

Sarría Villa, R. A., Gallo Corredor, J. A. y Tobar, Y. 2022. Estudio de las mejores condiciones para determinar plaguicidas en aguas y sedimentos del Río Cauca-Colombia. *Revista EIA*, 20(39), 3904, 1–20. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1608>

Tejeda-Benítez, L., Noguera, K., Aga, D. y Olivero-Verbel, J. 2023. Pesticides in sediments from Magdalena River, Colombia, are linked to reproductive toxicity on *Caenorhabditis elegans*. *Chemosphere*, 339, 139602. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139602>

Tobón-Marulanda, F. Á., López-Giraldo, L. A. y Paniagua-Suárez, R. E. 2010. Contaminación del agua por plaguicidas en un área de Antioquia. *Revista de Salud Pública*, 12(2), 300–307. <https://doi.org/10.1590/s0124-00642010000200013>

Toro-Osorio, B. M., Rojas-Rodríguez, A. E. y Díaz-Zapata, J. A. 2017. Levels of serum cholinesterase in coffee growers from the Caldas department, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 19(3), 318–324. <https://doi.org/10.15446/rsap.v19n3.52742>

Torres Gutierrez, M. A., Pozo Gallardo, K. A. y Díaz García, V. M. 2021. Influencia de la degradación del Clorpirifos en la detección analítica utilizando biosensores: revisión del estado actual y aspectos futuros. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 15(30), 9–21. <https://doi.org/10.31908/19098367.2102>

Valenzuela-Vergara, E., Castañeda-Sánchez, D. y Cano-Londoño, N. (2019). Determination of plantain crops associated with coffee environmental impacts on agroecosystems by means of life cycle assessment: Case study in the southwest of Antioquia (Colombia). *DYNA (Colombia)*, 86(211), 112–121. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.75356>

Vásquez, E., Peñuela, G. y Agudelo, S. 2013. Estudio de la fotodegradación del clorotalonilo usando las técnicas de fenton y fotocatalisis con dióxido de titanio mediante radiación solar. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (51), 112–120. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.14926>

Vásquez Venegas, C. E., León Cortés, S. G. y González Baltazar, R. 2015. Agroquímicos y Afectaciones a la Salud de Trabajadores Agrícolas: Una Revisión Sistemática. *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, 5(1), 35–37.

Vivas Darío, G. D. 2020. Efectos de la contaminación por agroquímicos en agua y suelo. Trabajo de Grado en Ingeniería Ambiental. Universidad Científica del Sur, Facultad de Ciencias Ambientales, programa de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12805/1527>

Wang, Z., Cheng, Y., Wang, C., Guo, R., You, J. y Zhang, H. 2023. Optimizing the performance of Fe-based metal-organic frameworks in photo-Fenton processes: Mechanisms, strategies and prospects. In *Chemosphere*, 339, 139673. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139673>